心理学报 2022, Vol. 54, No. 6, 595−603
Acta Psychologica Sinica

https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2022.00595

不确定性和预期有效性对运动方向感知决策的影响*

潘玥安[1] 姜云鹏[1,2,3] 郭茂杰[1] 吴 瑕[1,2,3,4]

([1] 天津师范大学心理学部; [2] 教育部人文社会科学重点研究基地天津师范大学心理与行为研究院;
[3] 学生心理发展与学习天津市高校社会科学实验室, 天津 300387) ([4] 中国科学院大学心理学系, 北京 100049)

摘 要 环境中的运动刺激往往多变, 更好的方向感知需要同时依赖当前信息和先验信息。然而, 当前刺激的不确定性与先验线索的预期有效性在运动方向感知决策中如何整合尚不清楚。研究采用随机点运动范式, 要求被试判断散点群的整体运动方向, 方向一致的散点为相干点, 其比例越低, 不确定性越高。实验 1 比较了不同相干点比例下的感知准确度。根据实验 1 的结果, 选出 20%和 60%的相干点比例分别对应实验 2 中散点群的高、低不确定性水平。实验 2 比较了高、低不确定性和高、低预期有效性(线索正确预测目标的概率)下的感知准确度。结果发现, 随着不确定性的降低和预期有效性的增加, 感知准确度显著提高; 预期效应(高、低有效性下感知准确度的差异)随不确定性的提高而增加。结果表明, 先验信息与感觉信息能在运动方向感知决策中整合。研究为双重控制机制(DMC)理论下主动性与反应性控制协同工作的观点提供了实证支持, 并为交通事故的解释与预防提供了理论依据。

关键词 预期效应, 不确定性, 运动方向感知决策, 随机点运动范式, 认知控制
分类号 B842

1 引言

外部世界是充满运动的, 准确识别刺激的运动方向, 不仅有利于个体在进化意义上更好地躲避天敌和捕获猎物, 对于现实生活中的交通出行也至关重要。当运动刺激不确定时, 如能见度较低的大雾天气或路况复杂的学校路段, 行人和来往车辆的运动方向有多种可能性, 需要个体做出运动感知决策, 即在多个感觉刺激的推测中做出选择并执行动作反应(Hauser & Salinas, 2019)。为了优化对不确定的运动刺激的推理, 个体往往根据可靠性(由该通道所接收信息的噪音分布决定)将来自单一或多个感觉通道的信息加以整合(刘强 等, 2010)。近年来, 有研究发现个体能够将来自视觉和前庭的运动信息进行整合, 证实了方向感知决策中的跨通道信息整合(Cullen & Taube, 2017; Moser et al., 2017; Kayser & Kayser, 2020)。然而, 对于同一通道内的信息, 个体如何整合当下感知的刺激(即感觉信息)与先前掌握的知识(即先验信息)有待进一步探讨。

运动方向感知决策会受到感觉信息本身的不确定性影响。在运动方向感知决策中, 模糊的运动刺激往往使个体不足以做出方向判断, 进而阻碍后续的动作反应。不确定性的概念来自信息论, 是指感觉信息信噪比, 即信号与噪声的比例(Fan, 2014)。不确定性被引入感知决策领域, 被认为由心理运算量大小决定。不同任务类型中的不同指标, 如认知负载、信息熵(information entropy)、惊奇度(surprise)或信息率(information rate)等, 都被认为是不确定性的不同表现(Fan, 2014; Mackie & Fan, 2017)。以往研究认为, 调节感觉任务的关键因素是任务类型或者信息通道, 它们帮助调节认知控制网络的激活模式, 进而帮助个体完成感觉决策(Piedimonte et al., 2015)。但元分析研究发现, 决定认知控制网络激活模式的因素不是任务类型或信息通道, 而是不确定

收稿日期: 2021-05-02
* 中国博士后科学基金(资助编号: 2021M693377)。
通信作者: 吴瑕, E-mail: wuxia@tjnu.edu.cn

性(Wu et al., 2019)。实验中常采用随机点运动模式(random dot motion patterns, RDPs)来考察运动方向感知决策，在包含相干点(方向一致)和干扰点(方向随机)的散点群中，要求被试对散点群的整体方向做出判断决策(Hauser & Salinas, 2019)。Kok 等(2013)发现，随着相干点比例提高(从 10%提高到 20%)，被试的判断准确率更高。然而，以往研究相干点比例的变化范围较小，很难全面的考察感觉信息的不确定性对运动感知决策的影响。因此，找到合适的相干点比例作为高、低不确定性的操作指标对于考察刺激不确定性的作用非常重要。

除了刺激的不确定性，对先验信息的预期也会对运动感知决策产生影响。预期效应体现为预期有效时个体的感知表现好于预期无效时(de Lange et al., 2018)，预期提高了感知过程的适应性(Clark, 2013; de Lange et al., 2018)。预期效应既可以来自生活经验(Dogge et al., 2019; Sotiropoulos et al., 2011)，也能通过操纵实验条件实现(Chalk et al., 2010; Gekas et al., 2013; Barbosa et al., 2017; Urgen & Boyaci, 2019)。有研究发现，运动刺激自身的频率能引导个体的预期(Sotiropoulos et al., 2011)。随着呈现给被试的刺激中高速刺激越来越多，个体原来预期出现慢速刺激的先验知识也随之更新，由该慢速刺激预期引起的偏差也逐渐减少甚至消除，证明了通过提高刺激出现频率形成的预期能在短时间对感知内容施加影响。然而，被试对高频刺激反应更快更准确，可能是源自于练习效应而非预期效应。除了目标刺激的频率，目标刺激的线索也能促进方向感知。通过习得环境线索的规律，个体能够利用先验信息做出对模糊运动刺激的方向预期，以弥补运动刺激信息的不足。有研究发现了线索形成的预期效应。被试需要报告以随机方向运动的散点的整体运动方向。在目标刺激之前呈现高、低音线索，两种声音分别对应两个固定方向。结果发现，被试对有线索提示的方向的准确率显著高于未被提示的方向，说明方向感知决策中存在预期效应，个体可以利用先验信息对运动刺激进行方向感知决策。然而，以往研究中提示的方向是固定的，无法排除线索与特定方向感知的固定联系所带来的练习效应。因此，来自线索预期有效性的先验信息如何影响运动方向感知决策有待进一步考察。

运动方向的感知决策既可以通过来自预期的先验信息的调节，也受到感觉信息的不确定性的影响。然而，不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的影响机制尚不清楚。主动性控制(preactive control)与反应性控制(reactive control)是信息加工系统中两种不同的认知加工模式。主动性控制发生在感知任务之前，通过持续保持任务目标以优化感知过程，从而促进被预期刺激的加工；反应性控制则在刺激出现后根据任务需要进行即时的处理，从而激活目标刺激的加工流程。刺激的不确定性能够改变信息的信噪比，从而影响感知决策，属于反应性控制。预期有效性不同的线索出现在刺激之前，并被保持在工作记忆中，根据任务目标来影响感知决策，属于主动性控制。目前，两种加工模式的关系并未达成共识。双重控制机制(the dual mechanisms of control, DMC) (Braver, 2012; Burgess & Braver, 2010; Speer et al., 2003)认为反应性控制与主动性控制彼此独立、相互取代。脑成像研究发现，两种加工模式分别对应不同的脑结构，主动性控制与外侧前额叶皮层(lateral prefrontal cortex)的激活有关，而反应性控制则与前扣带皮层(Anterior Cingulate Cortex, ACC)的激活有关(Botvinick et al., 2001)。行为研究发现，当预期到工作记忆负载较低时，个体倾向于采用主动性控制策略，使用先前工作记忆中的内容为后续感知做准备；相反，当预期工作记忆负载较高时，个体则会利用即时信息进行处理(Speer et al., 2003)。然而，与 DMC 理论不同，最近研究发现两种加工模式具有相同的大脑结构激活(Wu et al., 2019)，这表明两种加工模式可能涉及共同加工过程，进而协同工作。因此，同时考察不确定性与预期有效性的作用，在理论上能够探究反应性控制与主动性控制的关系，为完善 DMC 理论提供依据。

本研究通过两个实验来考察运动方向感知决策中感觉信息的不确定性和先验线索的预期有效性的整合机制。由于高、低不确定性缺乏在 RDPs 范式中对应的相干点比例，实验 1 采用 RDPs，通过比较多个相干点比例下的方向感知准确度，选出两种高、低相干点比例分别作为低、高不确定性的参数。在此基础上，实验 2 将 RDPs 和线索范式结合，即在 RDPs 前呈现高、低有效性的箭头线索，既控制刺激的不确定性(其具体参数由实验 1 选取)，还通过线索控制预期有效性，以此考察预期有效性与不确定性的共同影响。为了避免线索只提示固定的方向造成的练习效应，将预期有效性定义为线索正确预测相干点方向的比例。如果不确定性和预期有效性存在交互作用，即在同一任务中彼此影响，则

说明先验信息与感觉信息能够在运动感知决策中进行整合，进而说明反应性控制和主动性控制可能作用于相同加工过程。反之，则说明两种控制机制独立作用。

2　实验 1：刺激不确定性对运动方向感知决策的影响

为了给散点群整体运动方向的高、低不确定性选出合适的相干点比例，且避免天花板效应与地板效应，实验 1 考察了被试在不同相干点比例下完成方向感知决策任务的表现。选择高、低不确定性的相干点比例的标准为：高、低不确定性下被试表现差异显著，且均与完全确定(100%)和完全不确定条件(0%)差异显著。

2.1　被试

根据 G*Power 3.1 计算，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 且效应量 $f = 0.25$ 时，预测达到 90%的统计力水平所需样本为 24 人。实际招募某大学在校大学生 26 人，男生 10 人，女生 16 人，年龄在 19~26 岁之间($M = 21.00$ 岁，$SD = 1.52$ 岁)。所有被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无色盲或色弱，均无身心疾病。该实验经过伦理委员会审核，被试在实验前签署了知情同意书，完成实验后获得相应报酬。

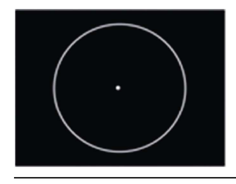
2.2　实验材料和仪器

实验程序使用 Matlab 2015b 和 Psychtoolbox Version 3.0.16 编写(Brainard, 1997; Pelly, 1997)，显示在 14 英寸电脑屏幕上，分辨率为 1024 × 768，刷新频率为 60 Hz。视距为 60 cm。目标刺激以随机点运动模式(random dot motion patterns, RDPs)呈现。RDPs 由 100 个散点组成，散点出现在中央圆形外环内的随机位置，朝某个方向直线运动，速度为 3°/s，动态刺激的刷新频率为 20 Hz。参照前人研究(Pilly & Seitz, 2009; Ho & Giaschi, 2009; Newsome & Department, 1998)，散点为白色(RGB 255, 255, 255)，直径为 0.1°，对比度为 117.0 cd/m^2。中央注视点为白色(RGB 255, 255, 255)，直径 0.3°，对比度为 117.0 cd/m^2。背景为黑色(RGB 0, 0, 0)，对比度 4.5 cd/m^2。圆形外环为白色(RGB 255, 255, 255)，直径 15°，粗细为 4 像素，对比度 117.0 cd/m^2。在散点呈现过程中，有一定比例的点向同一方向直线运动(相干点)，其余的点(噪声点)则以相同速度朝不同的随机方向直线运动。相干点有 8 种运动方向，从 0°开始，以 45°为间隔分布(0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°和 315°)。为避免被试对特定方向产生练习效应，0°位置在组间随机。为了避免个体对水平和垂直方向的感知更准确，即出现倾斜效应(Matthews & Qian, 1999)，相干点的移动方向均设置为非坐标轴方向。

2.3　实验流程与设计

实验 1 流程如图 1 所示。首先呈现 200 ms 注视点，随后呈现 1000 ms 目标刺激屏。要求被试在保持对中央圆点注视的情况下，判断圆环内大多数点的移动方向。为避免出现重复效应，相同运动方向最少间隔两个试次。目标刺激屏后进入反应屏。反应屏中包含了圆环及注视点，还有一个以注视点为固定端点并指向鼠标位置的白色箭头。被试的任务是通过移动鼠标来操控箭头朝向，以此完成对相干点运动方向的判断。箭头无初始位置被试移动鼠标前，屏幕中只呈现白色圆环与中央注视点。被试反应窗口为 30 s，之后呈现 1000~1500 ms 间隔。

实验 1 为单因素 6 水平的被试内设计，通过相干点比例改变刺激的不确定性水平，相干点比例越高，不确定性越低。6 种相干点比例为 100%、80%、70%、60%、20%和 0%。相干点比例的设置参考前人研究(Singh & Fawcett, 2008)，选取的标准为两种比例的表现应当存在显著差异。此外，为了避免存在天花板效应与地板效应，还设置了 0%与 100%比例。选取的标准为高比例(低不确定性水平)条件下的表现应当与 100%比例的表现存在显著差异，否则无法排除天花板效应；低比例(高不确定性水平)条件下的表现应当与 0%比例的表现存在显著差异，否则无法排除地板效应。正式实验包含 6 种不确定性水平 × 8 种相干点运动方向 × 8 试次/处理 = 384 个试次，总时长约为 30 分钟。



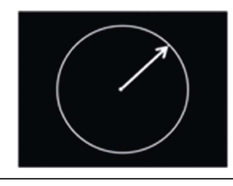
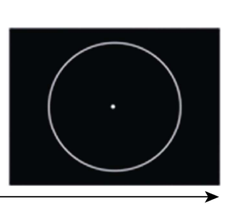



图 1　实验 1 的流程示意图

实验记录被试的绝对误差(E_{deg})，即被试通过鼠标选择的箭头方向与相干点运动方向的夹角度数。顺时针和逆时针均记为正数。实验因变量为反应准确度(P_R)，是对绝对误差做归一化处理后产生的百分数。由于被试在判断散点方向时记录误差不分顺时针和逆时针，最小误差为 0°，最大误差为 180°，因此无法判断方向、完全猜测情况下的误差均值为 90°，故转化公式为 $PR = 100\% \times \frac{(90° - Edeg)}{90°}$。例如某次被试反应的误差角度(反应的方向与相干点运动方向的角度差)高达 80 度，那么其 $PR = 100\% \times \frac{(90° - 80°)}{90°} = 11\%$，则该被试的反应准确度仅为 11%。

2.4 结果

6 种相干点比例下被试的 P_R 结果如图 2 所示。单因素方差分析的结果显示差异显著，$F(5, 150) = 1259.7$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.977$。多重比较结果显示，20%比例下的 P_R (45.08 ± 9.78%, *M* ± *SD*, 下同)与完全确定条件(100%) (90.69 ± 2.29%)和完全不确定条件(0%) (6.54 ± 3.95%)差异均显著，$p < 0.001$，说明 20%适合作为高不确定性的相干点比例。80% (90.23 ± 2.43%)和 70% (89.77 ± 2.60%)与完全确定条件的差异不显著($p = 0.74$, $p = 0.51$)，但 60% (87.58 ± 4.84%)与完全确定条件(100%)的差异显著，$p = 0.028$，且 60%与 20%差异显著，$p < 0.001$，说明 60%适合作为低不确定性的相干点比例。因此，实验 2 中选择 20%和 60%分别作为高、低不确定性的相干点比例指标。

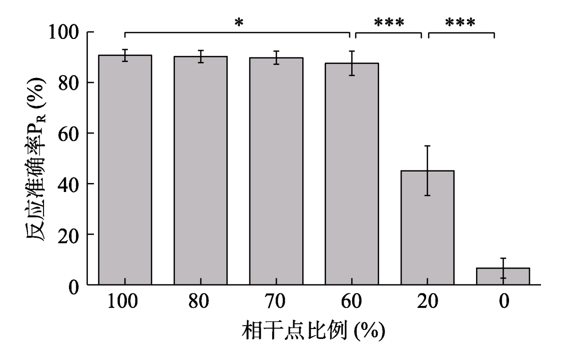


图 2 不同相干点比例下反应准确率 P_R 平均值(标准误)
注: $*p < 0.05$ $***p < 0.001$

3 实验 2: 不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的影响

3.1 被试

根据 G*Power 3.1 计算，在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 且效应量 $f = 0.25$ 时，预测达到 80%的统计力水平所需样本为 24 人。实际招募某大学在校大学生 25 人，男生 10 人，女生 15 人。被试的年龄在 19~26 岁之间(*M* = 20.92 岁, *SD* = 1.28 岁)。所有被试均为右利手，视力或矫正视力正常，无色盲或色弱，均无身心疾病。该实验经过伦理委员会审核，被试在实验前签署了知情同意书，完成实验后获得相应报酬。

3.2 实验材料、仪器与设计

实验 2 的材料和仪器与实验 1 一致。

实验 2 的流程如图 3 所示。首先呈现 300 ms 线索屏，呈现绿色(RGB 0, 176, 80)或红色(RGB 255, 0, 0)的箭头线索(图中用深灰和浅灰代替红色和绿色)，长度为圆环半径。线索屏后呈现 200 ms 的注视点，随后呈现 1000 ms 的目标刺激屏。要求被试保持对中央圆点的注视，并判断大多数点的移动方向。目标刺激呈现之后进入反应屏，被试需要移动鼠标来操控箭头指示出相干点的运动方向。箭头无初始位置，鼠标移动前只呈现白色圆环与中央注视点。被试反应窗口为 30 s。之后进入 1000~1500 ms 间隔。

实验为 2 (刺激不确定性: 高、低) × 2 (预期有

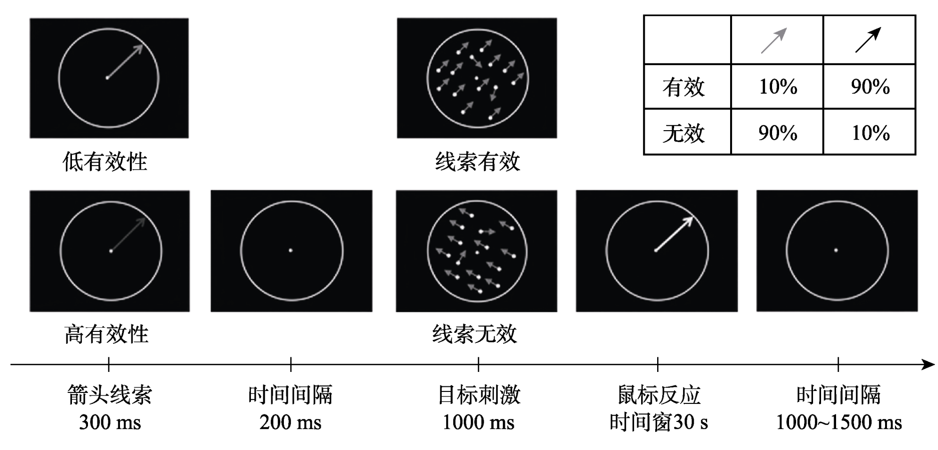


图 3 实验 2 流程示意图

效性: 高、低)被试内设计。根据实验 1 的结果, 将高、低不确定性的相干点比例分别设为 20%和 60%。同时, 将高、低预期有效性设置为 90%和 10%。预期有效性是指线索正确提示相干点方向的概率。线索正确提示是指线索指向和相干点运动方向的绝对夹角在 22.5° (两个相邻运动方向夹角的一半)范围内。高预期有效性的线索, 其颜色能够较为准确地预测相干点运动方向, 正确提示的概率是 90%; 低有效性线索的颜色不能很好地预测相干点的运动方向, 正确提示的概率仅为 10%。预测有效性的比例设置参考了前人研究(Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013)。线索的颜色(红色或绿色)和预期有效性(高、低)在被试间平衡。正式实验在 32 个练习试次后开始, 一共有 256 个试次(2 种预期有效性 × 2 种不确定性水平 × 8 种相干点运动方向 × 8 试次/处理), 总时长约为 20 分钟。

3.3　结果

对所有条件下被试的 P_R (表 1)进行 2 (不确定性: 高、低) × 2 (预期有效性: 高、低)的重复测量方差分析。结果发现, 不确定性的主效应显著, $F(1, 24) = 362.45$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.938$, 低不确定性条件下的 P_R (90.69 ± 0.55%)显著大于高不确定性条件(52.01 ± 2.01%), 说明刺激的不确定性干扰了方向感知。预期有效性的主效应显著, $F(1, 24) = 10.137$, $p = 0.004$, $\eta^2 = 0.297$, 高有效性线索出现时的 P_R (74.27 ± 1.80%)显著高于低有效性线索出现时(68.43 ± 1.05%), 出现了预期效应, 说明线索提供的预测信息促进了方向感知的准确性。

表 1　不同条件下的反应准确度 P_R ($M \pm SD$, %)

反应准确度	高不确定性	低不确定性
高有效性	57.06 ± 17.41	91.49 ± 2.43
低有效性	46.97 ± 9.60	89.9 ± 3.35

更重要的是, 不确定性与预期有效性的交互作用显著, $F(1, 24) = 4.96$, $p = 0.036$, $\eta^2 = 0.17$。进一步事后比较发现, 低不确定性条件下存在预期效应, 高有效性线索出现时 P_R (91.49 ± 0.48%)显著高于低有效性线索出现时(89.90 ± 0.67%), $p < 0.001$。高不确定性条件下仍有预期效应, 高有效性线索(57.06 ± 3.48%)与低有效性线索(46.96 ± 1.92%)条件下 P_R 的差异显著, $p < 0.001$。为了进一步探讨不确定性对预期效应的影响, 对高、低不确定性下的预期效应(P_R 高有效性 − P_R 低有效性)进行配对样本 t 检验。结果如图 4 所示, 高不确定性的预期效应显著高于低不确定性的预期效应, $t(24) = -2.23$, $p = 0.036$, Cohen's $d = 0.69$, 95% CI = [−0.16, −0.01]。交互作用的结果表明, 运动方向感知决策需要整合感知信息的不确定性和先验背景的预期有效性, 预期有效性在不确定性高时影响更大, 而不确定性也能够影响预期有效性的效果。

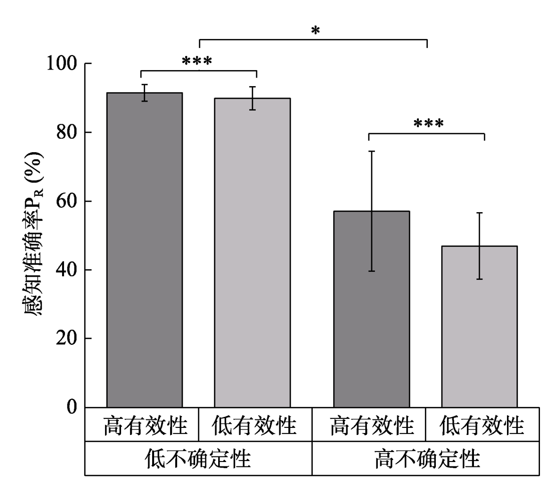


图 4　不同条件下反应准确度 P_R 平均值(标准误)
注: $^*p < 0.05$ $^{***}p < 0.001$

4　讨论

为了考察刺激不确定性与预期有效性对运动方向感知决策的影响, 研究采用 RDPs 范式, 实验 1 比较了在 6 种相干点比例下被试对散点群整体运动方向的反应准确度(P_R), 结果显示, 60%和 20%的比例条件下, 被试的 P_R 存在显著差异, 且不存在天花板效应与地板效应, 因此适合作为实验 2 中散点群整体运动的高、低不确定性的相干点比例。实验 2 在移动散点前呈现箭头线索, 通过相干点的比例操纵不确定性, 通过线索正确提示目标的概率操纵预期有效性。结果发现, 高不确定性下 P_R 更低, 说明感觉信息的不确定性水平会显著地影响方向感知决策。高预期有效性下 P_R 更高, 表明线索提供的先验信息显著影响运动方向感知决策。由于指导语中并未明确线索与目标的关联, 结果还说明了个体能主动学习背景环境以更新先验预期。更重要地, 刺激不确定性和预期有效性交互作用显著, 在两种不确定性中都出现了预期效应(高有效性下的表现显著好于低有效性), 但在低不确定性条件下的预期效应显著小于高不确定性条件。该结果证明了感觉信息的不确定性与先验信息的预期有效性在运动方向感知决策能够整合, 支持了主动性控制与反应控制协同工作的假设。

研究发现，预期效应随不确定性增加而提高。个体对预期有效性的利用受不确定性调节，说明感觉信息和先验信息能够在运动方向感知决策中彼此整合。该结果对 DMC 理论进行了修正，表明主动性控制与反应性控制涉及了相同的加工过程，彼此协同工作。该同一认知过程可能是认知控制(cognitive control)过程。认知控制是高级认知加工的核心功能，它能在不确定的环境中协调心理操作，选择并优先处理重要信息(Wu et al., 2019)。有研究认为，较低的预期有效性下，线索正确预测目标的概率较变低，个体会面临因线索失效而导致的不确定(Mushtaq et al., 2011; Yu & Dayan, 2005)。因此，“不确定性”的认知加工不只是感觉信息引起的反应性控制，也可能是由预期有效性引起的主动性控制。当感觉信息不确定性低时，反应性控制足以完成任务，因此预期效应较小；而当感觉信息不确定性高时，则需要主动性控制加入来共同完成任务，因此预期效应更大。脑成像的研究也发现，刺激不确定性和预期有效性具有脑区激活的广泛重叠。如 Mushtaq 等(2011)发现，预期不确定任务与认知控制任务在背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)、后顶叶皮层(posterior parietal cortex, PPC)、前扣带回皮层(Anterior Cingulate Cortex, ACC)等区域均有激活。综上，预期有效性与不确定性的整合机制支持了主动性控制和反应性控制协同工作的假设(Wu et al., 2019)。未来的脑成像研究可以更加深入地探讨共同的加工过程及其涉及的脑区。

此外，研究发现刺激的不确定性会影响运动方向感知决策，P_R 随着不确定性提高而降低。以往研究发现，相干点比例的降低不利于被试的方向感知准确率(Pilly & Seitz, 2009; van Maanen et al., 2012)，但并未对相干点比例进行合适的选取。本研究选取了合适的相干点比例，对不确定性的加工机制进行深入探讨。不确定性对运动方向感知的影响可能有两种解释。一种是信号积累模型(the Diffusion Decision Model, DDM)。DDM 认为，信号量积累到特定阈限时个体做出感知决策行为。Kayser, Erickson 等人(2010)发现，当个体在完成运动感知决策任务时，MT 区的激活程度随不确定性的提高而降低，且激活模式与 DDM 拟合良好。因此，可能随着不确定性的提高，来自刺激的有效信号减弱，信号量更难达到特定阈限，进而个体做出更不准确的感知判断(Ratcliff & McKoon, 2008)。另一种解释是认知控制。认知控制是指在不确定的条件下个体完成目标任务时对自身行为的协调和抑制(Wu et al., 2019)。以往研究发现，随着相干点比例降低，即不确定性提高，表征运动信息的 MT 区激活程度更低，但同时认知控制网络中相关的区域反而有更强的激活，如顶内沟(intraparietal sulcus, IPS)、前额眼动区(frontal eye fields, FEFs)和前扣带回等(the anterior cingulate cortex, ACC) (Kayser, Erickson, et al., 2010; Kayser, Buchsbaum, et al., 2010)。运动刺激的感觉信息在 MT 区进行初步表征，因此 MT 区在更低的信噪比(即更高的不确定性)下激活更弱。而高水平的认知控制网络负责对更抽象的信息(即不确定性)进行加工，实现对 MT 区自上而下地调节，以帮助个体更好地完成感知决策，因此在高不确定性下激活更强。

此外，本研究发现预期有效性能够影响方向感知决策，P_R 随有效性增加而提高，即出现预期效应。该结论将预期效应拓展到了运动方向感知决策领域。在推理性感知领域，研究普遍认为预期效应的内在机制是贝叶斯推理(Clark, 2013; de Lange et al., 2018)，即个体不仅利用先验信息(如刺激的先验概率)促进感知，还会将即时信息与先验信息对比，根据其不一致程度(预期错误, prediction error)更新后续预期(Aitchison & Lengyel, 2017)，以此灵活地优化整个推理感知过程(Chalk et al., 2010; Clark, 2013; 张沥今 等, 2019)。在方向感知决策领域也存在对预期效应机制的研究。Sotiropoulos 等人(2011)发现个体的预期会随着刺激频率更新，进而优化运动刺激的方向感知。Kok 等人(2013)发现，RDPs 任务中音调线索引起的初级视觉皮层的激活模式也符合贝叶斯推理模型。以上结果说明，在方向感知领域也存在预期效应，且其内部机制符合贝叶斯推理，即个体利用环境中与运动刺激相关联的先验信息优化运动刺激的感知决策。然而，以往研究忽视了“刺激本身的频率” (Sotiropoulos et al., 2011)或者“提示固定方向的线索” (Aitken et al., 2020; Kok et al., 2013)可能引起的练习效应。本研究没有将颜色或音高与固定方向简单对应(Kok, 2013)，而是使箭头线索在 0 到 360 度的范围内随机指示，更接近现实中的运动方向感知情境，提高了研究的外部效度。同时，本研究中的线索的预期有效性与颜色的对应关系并未事先告知被试，且在练习阶段只反馈给被试其判断的误差角度，不包括箭头线索是否预测准确。因此，预期效应的出现说明被试在实验过程中逐渐完成了对预期的修正，这符合贝叶斯推理

模型对个体行为的描述。

此外, 线索预期有效性可能是由对线索的注意调控引起的。然而, 传统选择性注意研究中的线索有效性是对线索和目标空间位置的注意引导(无论是外源性还是内源性线索), 线索和目标都具有空间性, 因此对线索的(外源性或内源性)注意会影响对目标的判断。而本研究的预期有效性是关联性学习的产物, 即线索的颜色代表有效性的高低, 而线索的箭头朝向与目标刺激的朝向有概率(90%或10%)保持一致。线索具有直接指向的方向性, 但目标的运动朝向是通过对相干点的运动方向感知决策来确定的, 线索与目标的空间及物理属性均不相同。因此, 对线索的注意分配不会影响对目标散点朝向的判断, 结果的差异也不是由于注意的调控引起的。为了和传统的线索有效性进行区分, 本研究均采用"预期有效性"来描述由线索和目标运动方向的关联引发的预期效果。总的来说, 本研究区分与空间线索有效性, 对预期效应的贝叶斯推理在方向感知领域进行了拓展和延伸。

探讨信息不确定性和预期有效性对运动感知决策的共同影响, 有助于理解和预防交通事故的发生。根据情景意识理论(the theory of situation awareness) (Endsley, 1995), 驾驶者完成与行人的安全交互(safe interaction)需要完成三个层面的认知过程: 侦测到行人、察觉行人的运动意图和预测行人的后续运动。关于前两个认知过程的研究较为充分(Vlakveld et al., 2018; Yuan et al., 2020), 而本研究主要探讨个体对行人后续运动过程的预测, 考察的是驾驶者在复杂路况中如何预判运动物体方向并准确反应。如在大雾等能见度较低的天气, 运动刺激的不确定性较高, 驾驶员的方向感知决策会同时受到不确定性和先验预期的影响。根据本研究结果, 驾驶员需要适当增加自身对先验信息的利用, 如避免疲劳驾驶, 提高对交通灯和指挥员的关注, 以及开启导航, 即使是熟悉路段。因此研究有利于解释驾驶者如何根据路况或天气等外部环境的不确定性, 调整对来往车辆或行人运动方向的预测和感知, 为理解和预防交通事故提供理论支持。

5　结论

研究采用 RDPs 范式及其变式, 发现个体对运动刺激方向的感知准确度随不确定性增加而降低, 随预期有效性增加而提高。更重要地是, 预期效应随不确定性的提高而增加, 表明先验信息的有效性与感觉信息的不确定性能够在方向感知决策过程中整合, 为主动性控制与反应性控制协同工作提供了实证支持。此外, 研究也为交通事故的发生与预防提供了理论依据。未来研究可以进一步在模拟驾驶中考察不确定性和预期有效性对不同特征(如性别、驾龄等)的驾驶员的运动方向感知决策的影响, 以促进其更好地应对现实中各种复杂的情境。

参　考　文　献

Aitchison, L., & Lengyel, M. (2017). With or without you: Predictive coding and Bayesian inference in the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, *46*, 219–227.

Aitken, F., Turner, G., & Kok, P. (2020). Prior expectations of motion direction modulate early sensory processing. *Journal of Neuroscience*, *40*(33), 6389–6397.

Barbosa, L. S., Vlassova, A., & Kouider, S. (2017). Prior expectations modulate unconscious evidence accumulation. *Consciousness and Cognition*, *51*, 236–242.

Botvinick, M. M., Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, *108*(3), 624–652.

Brainard, D. H.. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial vision*, *10*(4), 433–436.

Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control: A dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(2), 105–112.

Burgess, G. C., & Braver, T. S. (2010). Neural mechanisms of interference control in working memory: Effects of interference expectancy and fluid intelligence. *PloS One*, *5*(9), e12861. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012861

Chalk, M., Seitz, A. R., & Seriès, P. (2010). Rapidly learned stimulus expectations alter perception of motion. *Journal of Vision*, *10*(8), 1–18.

Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, *36*(3), 181–204.

Cullen, K. E., & Taube, J. S. (2017). Our sense of direction: Progress, controversies and challenges. *Nature Neuroscience*, *20*(11), 1465–1473.

de Lange, F. P., Heilbron, M., & Kok, P. (2018). How do expectations shape perception?. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(9), 764–779.

Dogge, M., Custers, R., Gayet, S., Hoijtink, H., & Aarts, H. (2019). Perception of action-outcomes is shaped by life-long and contextual expectations. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–9.

Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, *37*(1), 32–64.

Fan, J. (2014). An information theory account of cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 680.

Gekas, N., Chalk, M., Seitz, A. R., & Seriès, P. (2013). Complexity and specificity of experimentally-induced expectations in motion perception. *Journal of Vision*, *13*(4), 1–18.

Hauser, C. K., & Salinas, E. (2015). Perceptual decision making. In *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (pp. 1–21). Springer New York.

Ho, C. S., & Giaschi, D. E. (2009). Low- and high-level first-order random-dot kinematograms: Evidence from fMRI. *Vision Research*, *49*(14), 1814–1824.

Kayser, A. S., Buchsbaum, B. R., Erickson, D. T., & D'Esposito,

M. (2010). The functional anatomy of a perceptual decision in the human brain. *Journal of Neurophysiology*, *103*(3), 1179−1194.

Kayser, A. S., Erickson, D. T., Buchsbaum, B. R., & D'Esposito, M. (2010). Neural representations of relevant and irrelevant features in perceptual decision making. *Journal of Neuroscience*, *30*(47), 15778−15789.

Kayser, S. J., & Kayser, C. (2020). Shared physiological correlates of multisensory and expectation-based facilitation. *ENeuro*, *7*(2), 1−13.

Kok, P., Brouwer, G. J., van Gerven, M. A. J., & de Lange, F. P. (2013). Prior expectations bias sensory representations in visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *33*(41), 16275−16284.

Liu, Q., Hu, Z. H., Zhao, G., Tao, W. D., Zhang, Q. L., & Sun, H. J. (2010). The prior knowledge of the reliability of sensory cues affects the multisensory integration in the early perceptual processing stage. *Acta Psychologica Sinica*, *42*(2), 227−234.

[刘强，胡中华，赵光，陶维东，张庆林，孙弘进. (2010). 通道估计可靠性先验知识在早期的知觉加工阶段影响多感觉信息整合. *心理学报*, *42*(2), 227−234.]

Mackie, M.-A., & Fan, J. (2017). Functional neuroimaging of deficits in cognitive control. In E. Goldberg (Ed.), *Executive functions in health and disease* (pp. 249−300). Elsevier Academic Press.

Matthews, N., & Qian, N. (1999). Axis-of-motion affects direction discrimination, not speed discrimination. *Vision Research*, *39*(13), 2205−2211.

Moser, E. I., Moser, M.-B., & McNaughton, B. L. (2017). Spatial representation in the hippocampal formation: A history. *Nature Neuroscience*, *20*(11), 1448−1464.

Mushtaq, F., Bland, A. R., & Schaefer, A. (2011). Uncertainty and cognitive control. *Frontiers in Psychology*, *2*, 1−14.

Newsome, W. T., & Paré, E. B. (1998). A selective impairment of motion perception following lesions of the middle temporal visual area (MT). *The Journal of Neuroscience*, *8*(6), 2201−2211.

Pelly, D. G., & Vision, S. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, *10*, 437−442.

Piedimonte, A., J. Woods, A., & Chatterjee, A. (2015). Disambiguating ambiguous motion perception: What are the cues?. *Frontiers in Psychology*, *6*, 1−13.

Pilly, P. K., & Seitz, A. R. (2009). What a difference a parameter makes: A psychophysical comparison of random dot motion algorithms. *Vision Research*, *49*(13), 1599−1612.

Ratcliff, R., & McKoon, G. (2008). The diffusion decision model: Theory and data for two-choice decision tasks. *European Journal of Pharmacology*, *20*(4), 873−922.

Singh, K. D., & Fawcett, I. P. (2008). Transient and linearly graded deactivation of the human default-mode network by a visual detection task. *NeuroImage*, *41*(1), 100−112.

Sotiropoulos, G., Seitz, A. R., & Seri è s, P. (2011). Changing expectations about speed alters perceived motion direction. *Current Biology*, *21*(21), 883−884.

Speer, N. K., Jacoby, L. L., & Braver, T. S. (2003). Strategy-dependent changes in memory: Effects on behavior and brain activity. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, *3*, 155−167.

Urgen, B. M., & Boyaci, H. (2019). When expectations are not met: Unraveling the computational mechanisms underlying the effect of expectation on perceptual thresholds. *BioRxiv*, 2−3.

van Maanen, L., Grasman, R. P., Forstmann, B. U., Keuken, M. C., Brown, S. D., & Wagenmakers, E. J. (2012). Similarity and number of alternatives in the random-dot motion paradigm. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *74*(4), 739−753.

Vlakveld, W., van Nes, N., de Bruin, J., Vissers, L., & van der Kroft, M. (2018). Situation awareness increases when drivers have more time to take over the wheel in a Level 3 automated car: A simulator study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, *58*, 917−929.

Wu, T., Chen, C., Spagna, A., Wu, X., Mackie, M.-A., Russell-Giller, S., … Fan, J. (2019). The functional anatomy of cognitive control: A domain-general brain network for uncertainty processing. *Journal of Comparative Neurology*, *528*(8), 1265−1292.

Yu, A. J., & Dayan, P. (2005). Uncertainty, neuromodulation, and attention. *Journal of Sensory Studies*, *46*(4), 681−692.

Chen, X., Yang, J., Oeser, M., & Wang, H. (Eds.). (2020). *Functional pavements*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003156222

Zhang, L. J., Lu, J. Q., Wei, X. Y., & Pan, J. H. (2019). Bayesian structural equation modeling and its current researches. *Advances in Psychological Science*, *27*(11), 1812−1825.

[张沥今，陆嘉琦，魏夏琰，潘俊豪. (2019). 贝叶斯结构方程模型及其研究现状. *心理科学进展*, *27*(11), 1812−1825.]

The influence of uncertainty and validity of expectation on the perceptual decision of motion direction

PAN Yuean[1], JIANG Yunpeng[1,2,3], GUO Maojie[1], WU Xia[1,2,3,4]

([1] *Faculty of Psychology, Tianjin Normal University*; [2] *Key Research Base of Humanities and Social Sciences of the Ministry of Education, Academy of Psychology and Behavior*; [3] *Tianjin Social Science Laboratory of Students' Mental Development and Learning, Tianjin* 300387, *China*) ([4] *Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract

Accurate perception of motion direction depends on current and prior information. However, it is not clear how the uncertainty of the current stimulus and the validity of expectation from prior information can be

integrated into the decision-making for the directional perception. In our experiment, the validity of expectation from a cue, which appears before the stimulus, belongs to the proactive control system, while the uncertainty of stimulus, which changes by the signal-to-noise ratio, belongs to the reactive control system. It is unclear whether the proactive and reactive control systems engage in standard processing or work independently.

In order to verify the integrated mechanism of the uncertainty of current sensory information and the validity of expectation from prior cue information on the perceptual decision of motion direction, two experiments were conducted. Experiment 1 employed random dot motion patterns (RDPs) to investigate the appropriate high and low uncertainty conditions. Participants should distinguish the moving direction of coherent dots (in the same direction) while noise dots move in a random direction. The P_R (perceptual accuracy) values were compared for various ratios of coherent dots (100%, 80%, 70%, 60%, 20%, 0%). The results indicated that the P_R of 60% ratio was significantly lower than that of 100%, while the P_R of 20% ratio was significantly different from that of 0% and 60%. Consequently, 20% and 60% ratios can be considered as high and low uncertainty conditions in Experiment 2, respectively.

Experiment 2 employed a task combined of associated learning and RDPs paradigm, in which a cue with high (90% correct) or low (10% correct) validity of expectation appeared before moving dots. Results showed that the P_R of high uncertainty was significantly lower than that of low uncertainty and reflected a significant increase in P_R with a valid cue, demonstrating an expectation effect. Moreover, there was considerable interaction between validity and uncertainty, while the expectation effect was found in both uncertainty conditions. However, the magnitude of expectation effect was lower in low uncertainty than in high uncertainty conditions, suggesting that uncertainty and validity can be influenced in standard cognitive processing.

In summary, based on the present results, the prior and sensory information can be integrated into motion perception decision-making. The results can support the cooperation mechanism of proactive and reactive control systems and provide a theoretical basis to prevent traffic accidents. Investigating the effects of uncertainty and validity on the perceptual decision of motion direction of specific individuals (such as veteran or aged drivers) can be considered a future research topic.

Key words expectation effect, uncertainty, directional perceptual decision, RDPs, cognitive control